

Diagnostic de fertilité des sols et conseils en fertilisation des principales cultures réunionnaises

Un système expert permet au laboratoire d'analyse du Cirad-Réunion de produire automatiquement des conseils en fertilisation pour les principales cultures, à partir des résultats des analyses de sol. Le choix d'une approche « sol » plutôt que « plante » est lié à la mise au point du système sur canne à sucre. Cette culture dominante (tableau 1) est en effet surtout produite par de petits exploitants chez lesquels le diagnostic de fertilité par prélèvement de feuilles (HALAIS, 1951, 1967) n'est pas réalisable. L'aspect plante est cependant envisagé. La mise en œuvre d'indices nutritionnels, fondés sur l'analyse de la biomasse produite, permet en effet de s'affranchir d'approximations concernant le type de sol, sa profondeur et l'enracinement des cultures.

Le conseil en fertilisation quantifie les éléments minéraux nécessaires à la culture et que le sol ne peut fournir. Ses composantes sont la fertilité chimique des sols et des besoins des cultures, eux-mêmes liés aux dyna-

miques de mobilisations minérales et aux exportations (CHABALIER *et al.*, 1984 ; CHABALIER et GAUDY, 1988 ; CHABALIER, 1988, 1989, 1990). Le conseil définit les corrections du sol pour que l'acidité, le phosphore assimilable et même le potassium soient acceptables pour la culture. Il détermine aussi un plan de fumure d'entretien de la culture pour une production donnée. La notion de fertilité chimique repose sur un classement des sols en unités agricoles homogènes. Ce classement permet un diagnostic de la capacité nutritionnelle du sol. Il est élaboré à partir de seuils caractéristiques des unités de sols identifiées par un classement selon des critères de fertilité.

Ce document présente successivement la typologie des sols, l'élaboration des seuils, le diagnostic de fertilité et le conseil en fertilisation pour la canne à sucre. Les autres cultures sont traitées comparativement à la canne. Les besoins des cultures, connus avec une précision suffisante, ne sont pas abordés.

D. POUZET, P.-F. CHABALIER, P. LEGIER
Station de la Bretagne BP 20,
97408 Saint-Denis messageries
Cedex 9, Réunion

Tableau 1. Principales cultures de la Réunion en 1993 (Agreste, 1994).

| Cultures | Surface | | Evolution annuelle | |
|---|---------|--------|--------------------|-----------|
| | ha | % SAU* | % par an | référence |
| Canne à sucre | 30 900 | 51,30 | - 2,39 | 8 ans |
| Graminées fourragères (prairies + parcours) | 12 390 | 20,60 | + 3,27 | 8 ans |
| Bananier | 900 | 1,49 | + 1,48 | 8 ans |
| Ananas | 800 | 1,33 | + 12,25 | 6 ans |
| Domaine d'application du système expert | 44 990 | 74,72 | — | — |
| Légumes | 3 600 | 5,98 | + 5,17 | 6 ans |
| Fruitier dont litchi, agrumes et mangues | 1 220 | 2,03 | + 16,07 | 5 ans |

* : Surface agricole utile

Historique

Les premières classifications des sols réunionnais sont de nature pédologique (RIQUIER, 1960 ; DIDIER DE SAINT-AMAND, 1965 ; BERTRAND, 1972 ; RIQUIER et ZEBROWSKI, 1975). Elles furent complétées par une classification morphopédologique fondée sur la formation des sols, leur modelé et leurs contraintes physico-chimiques (ANGE, 1974 ; BROUWERS et RAUNET, 1981 ; BROUWERS, 1982, 1984 ; RAUNET, 1986, 1988, 1989, 1990, 1991). Suite aux demandes de l'agriculture, orchestrées par la filière canne à sucre, cette dernière approche a été orientée vers les problèmes de fertilité. La construction du système expert de conseils en fertilisation a ainsi débuté en 1986. Elle s'inspire de travaux sur l'interprétation automatique des analyses de sol (REMY et MARIN-LAFLECHE, 1973) et du modèle généraliste de la Scpa (société commerciale des potasses et de l'azote), décrits par QUEMENER (1985). Elle s'appuie aussi sur des modèles dédiés au caféier (SNOECK et SNOECK, 1988 ; SNOECK et JAS-

DIN, 1990) et à l'amendement des sols acides. Ces derniers ont été notamment développés au Brésil (DOS SANTOS *et al.*, 1980), à Hawaii à partir des études de KAMPATH (Csr, 1986) pour les Ultisols, Oxisols et Inceptisols et aux Antilles pour les sols ferrallitiques (CABIDOCHÉ, 1989). Fondé sur la canne, le système réunionnais fut adapté aux graminées fourragères, à l'ananas et au bananier. Des demandes existent pour l'étendre aux principales cultures maraîchères et fruitières.

Typologie des sols réunionnais pour la fertilité : les unités de sol

Données

L'identification des unités de sols met en jeu le zonage géographique des potentialités agricoles et les caractéristiques morphopédologiques et chimiques des sols.

Le zonage géographique de l'île est fondé sur : les aptitudes et potentialités de production d'après les d'experts, la classification pédologique des sols, le découpage climatique de la météorologie nationale et des limites naturelles. Il définit 120 micro-régions.

Les caractéristiques morphopédologiques des sols sont données par la carte de l'île au 1/50 000 (RAUNET, 1988). L'auteur identifie 93 unités de milieu homogènes, à l'échelle considérée, pour le matériau constitutif, le climat, le modelé, le sol, la végétation naturelle et le fonctionnement hydrique (RAUNET, 1990, 1991). Ces unités ont été groupées selon des critères sol, en 27 domaines pédogénétiques dans une carte simplifiée au 1/250 000 (RAUNET, 1989). Ces 27 types de sol, codifiés selon des normes STIPA (1982) adaptées aux conditions réunionnaises, ont été réduits à 24 par élimination de 3 domaines sans intérêt agricole.

Les données sur la composition chimique des sols proviennent des résultats de 15 000 sols analysés, disponibles en 1992. Chaque échantillon de sol analysé est localisé sur la carte IGN au 1/25 000 dans un quadrillage de carrés de 500 mètres de côté. Les neuf variables suivantes sont utilisées : humidité de travail (séchage à l'air), pH-eau, pH-KCl, azote (N) total, phosphore (P) assimilable, bases échangeables (Ca, Mg, K) et capacité d'échange cationique (CEC). Le phosphore total, difficile à analyser et fortement corrélé au phosphore assimilable, tout types de sol confondus (tableau 2), n'a pas été retenu. Seuls 23 types de sols étaient bien représentés dans la base du laboratoire.

Tableau 2. Relations entre variables chimiques (milliéquivalent/100g).

| Unités de sol | pH = f(Ca), $r^2 > 0,9$ | CEC = f(Ca) | r^2 | Phosphore (n = 1 500) |
|------------------------|--|--------------------------------|-------|--|
| Ferrallitique | $pH = 4,53 \times \exp(0,03 \text{ Ca})$ | $CEC = 1,52 \text{ Ca} + 2,56$ | 0,74 | $P \text{ total} = 1 423 \times \exp(0,02 \text{ Pass})$ $r^2 = 0,87$ |
| Vertique | $pH = 7,01 / (1 + 0,38 \times \exp(-0,24 \text{ Ca}))$ | $CEC = 1,24 \text{ Ca} + 12,5$ | 0,85 | |
| Brun | $pH = 6,98 / (1 + 0,54 \times \exp(-0,15 \text{ Ca}))$ | $CEC = 1,39 \text{ Ca} + 3,61$ | 0,79 | |
| Brun andique | $pH = 0,12 \text{ Ca} + 4,72$ | $CEC = 1,27 \text{ Ca} + 3,60$ | 0,83 | |
| Andique non perhydraté | $pH = 4,9 \times \exp(0,02 \text{ Ca})$ | $CEC = 1,25 \text{ Ca} + 3,68$ | 0,76 | |
| Andique perhydraté | $pH = 6,04 / (1 + 0,22 \times \exp(-0,19 \text{ Ca}))$ | $CEC = 1,16 \text{ Ca} + 4,62$ | 0,54 | |

Méthodologie

Les unités de sol sont déterminées par le traitement des variables chimiques groupées selon leur origine (DESCUNS, 1992). L'étude statistique descriptive met en jeu, en premier lieu l'analyse de la distribution des caractéristiques chimiques des sols et en second lieu, leurs analyses en composantes principales (ACP) après groupement selon les types de sol et les micro-régions.

L'analyse des distributions permet de créer, par des découpages géographiques adaptés, des unités de sol homogènes. Le caractère homogène correspond à une distribution unimodale de l'ensemble des variables du domaine (figure 1).

L'ACP permet de synthétiser, sur des axes indépendants, hiérarchisés par la quantité d'information qu'ils contiennent, l'ensemble des sols caractérisés par leurs variables. Visualisés sur les différents plans engendrés par les axes, on peut alors proposer des groupes de sol ayant les mêmes caractéristiques. L'examen des liaisons entre les variables se réalisera en regardant leur position dans le cercle des corrélations et ces variables pourront être également projetées sur les plans des sols.

L'homogénéité des unités de sol résultantes est contrôlée par comparaison d'une part des moyennes (moyenne \pm écart type) des types de sols par unités et d'autre part des régressions entre les principales

variables corrélées par type de sol. Le caractère uniforme des microrégions pour les unités de sol est contrôlé par le calcul d'indices comparant les caractéristiques moyennes de la région à celle de l'unité de sol, c'est-à-dire l'écart des moyennes entre région et unité, rapporté à l'écart type de l'unité de sol soit :

$$\text{l'indice} = (X_{\text{région}} - X_{\text{unité}}) / \sigma_{\text{unité}}$$

Résultats

Cinq types de sol présentant des distributions bimodales de quelques variables ont été découverts en 13 sous types unimodaux identifiés par leur position géographique. De ce découpage, ressortent 31 types de sol.

Les ACP ont porté sur une gamme de 25 à 36 types de sol, nombres qui résultent de l'élimination ou non de types mal représentés et du traitement simultané ou non des types redécouverts avec les sous types. Une analyse portant sur 35 types de sols et 8 variables (pH, N total, P assimilable, Ca, Mg, K, CEC et taux de saturation) confirme le découpage de 4 des 5 types hétérogènes. Ces résultats sont confirmés par une ACP portant sur 3 variables (pH, N et P assimilable) retenues après élimination des variables fortement corrélées au pH (CEC, Ca, Mg, K).

De nombreuses ACP, réalisées avec les types de sol résiduels, conduisent au groupement des sols en 6 unités, illustrées par le plan principal

(figure 2) obtenu avec introduction des variables N, P assimilable, pH-eau, pH-KCl et de $\Delta(\text{pH})$ (écart entre pH eau et KCl).

Les contributions des 3 axes à la variation totale sont de 69,2 %, 17,2 % et 6,2 %. L'axe 3 qui a une valeur propre de 0,559 n'apporte pas d'autre information particulière. L'axe 1 représente les pH et leurs différences. L'axe 2 est surtout lié au phosphore assimilable et un peu moins à l'azote total. L'introduction de la variable humidité du sol après séchage confirme l'identité de deux groupes d'andosols, qui n'apparaissent pas dans toutes les représentations.

L'étude comparée, entre unités de sol, des moyennes et écarts types de chaque variable confirme la typologie. La proximité des distributions des caractéristiques chimiques des types de sol d'une même unité renforce ce résultat. Dans la grande majorité des cas, les corrélations entre pH, calcium et CEC (figure 3) présentent une bonne analogie pour les types de sol appartenant à une même unité. Les caractéristiques chimiques permettent de distinguer les unités entre elles (tableau 3). Ainsi, les vertisols s'individualisent par les caractéristiques du complexe absorbant et le pH, les sols bruns par leur richesse en bases et les andosols par la matière organique (azote). Les sols andiques diffèrent des autres sols par le phosphore.

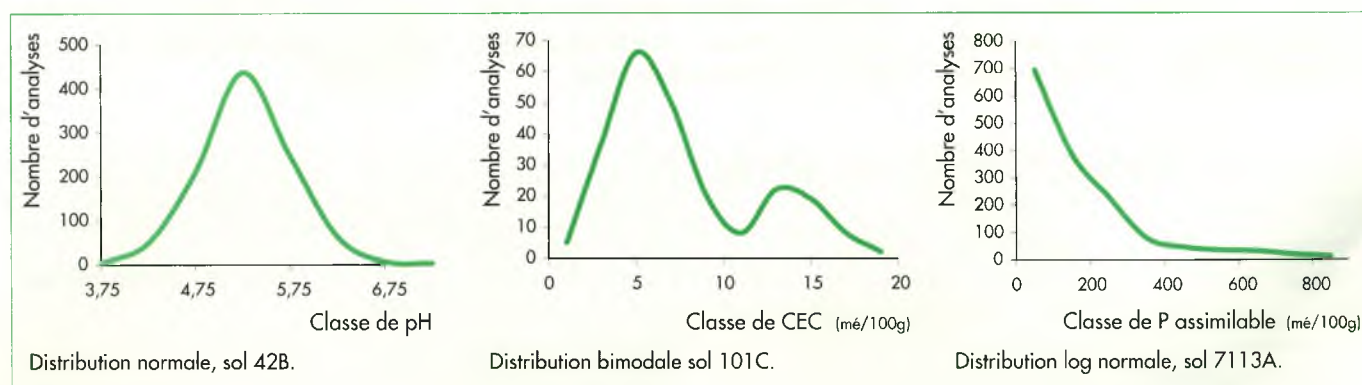


Figure 1. Distribution de quelques variables par type de sol (code STIPA réunion).

Quelques types de sol mal représentés chimiquement ou statistiquement ont été traités *a posteriori*. Certains alluvions sont classés comme les sols amonts, dont ils sont issus en raison

de caractéristiques chimiques toujours très proches. D'autres sols ont pu être rattachés à une unité grâce à l'analogie des corrélations.

Les 120 micro-régions ont été partiellement redéfinies lorsque les distributions faisaient apparaître plusieurs unités de sol (CHABALIER et LEGIER, 1992 ; Cirad, 1995). La partie agricole de l'île comprend actuellement 155 micro-régions (figure 4). Ce résultat sera actualisé pour utiliser l'accroissement annuel de 2 000 à 3 000 analyses de la base. Notre échantillonnage est en effet réduit, en comparaison des 340 000 analyses mises en jeu en Bretagne par LELEUX *et al.* (1984) pour une étude similaire. La répartition spatiale des analyses effectuées ces 7 dernières années atteste de cette limite quantitative (figure 4).

Courant 1997, la base de données comprenait plus de 25 000 analyses de sol réparties en 2 927 carrés de 500 mètres. Les champs de la base concernent :

- l'échantillon (date, commune, lieu-dit, altitude, agriculteur, culture ou objet de l'analyse) ;
- le type de sol (STIPA, 1982) et l'unité à laquelle il se rattache ;
- les caractéristiques chimiques principales, ou variables chimiques, dont pH eau, pH KCl, N total, P total et assimilable, bases échangeables (Ca, Mg, K) et capacité d'échange (CEC) ;
- les caractéristiques climatiques du lieu de prélèvement.

Caractérisation de la fertilité chimique des sols : principe des seuils

Le diagnostic de fertilité est réalisé à partir de seuils (Scpa, 1981), qui constituent des normes d'interprétation des variables chimiques. Des grilles de 4 seuils (nommés S1 à S4) sont formées pour chaque unité de sol et chaque variable chimique.

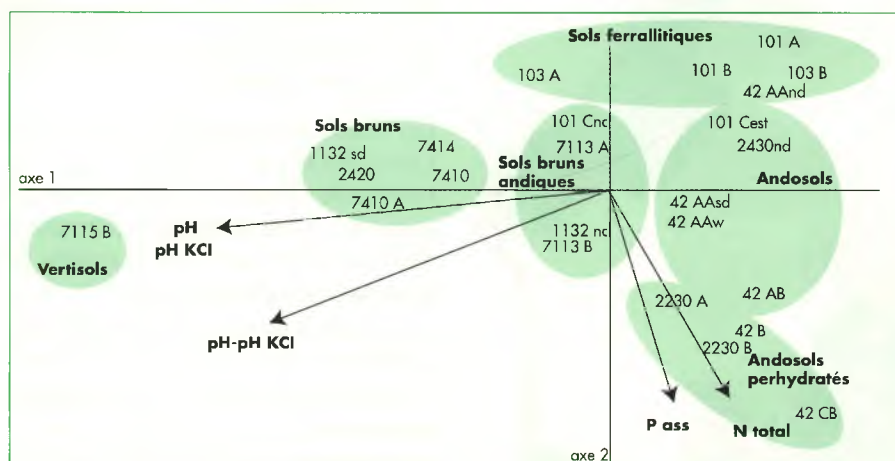


Figure 2. Plan principal de projection des 28 types de sol (24 représentés) repérés par leurs codes STIPA.

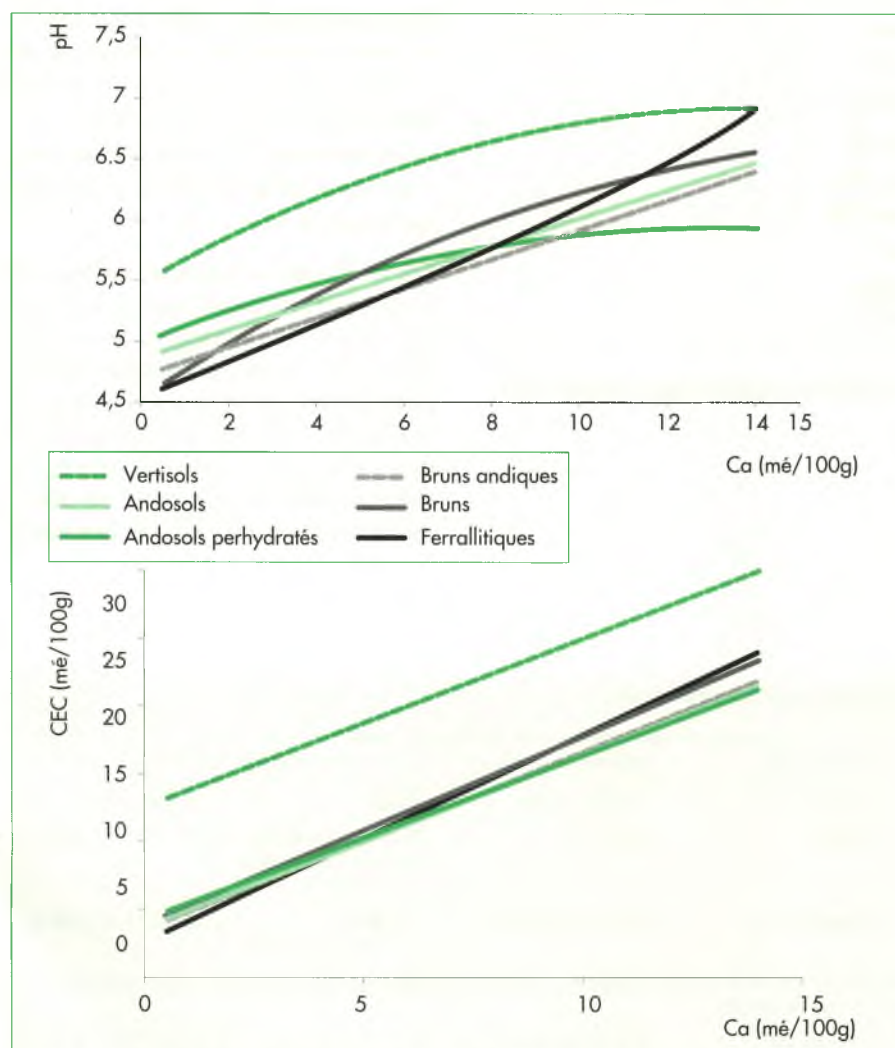


Figure 3. Relations entre le pH, la CEC et le calcium pour les 6 unités de sol.

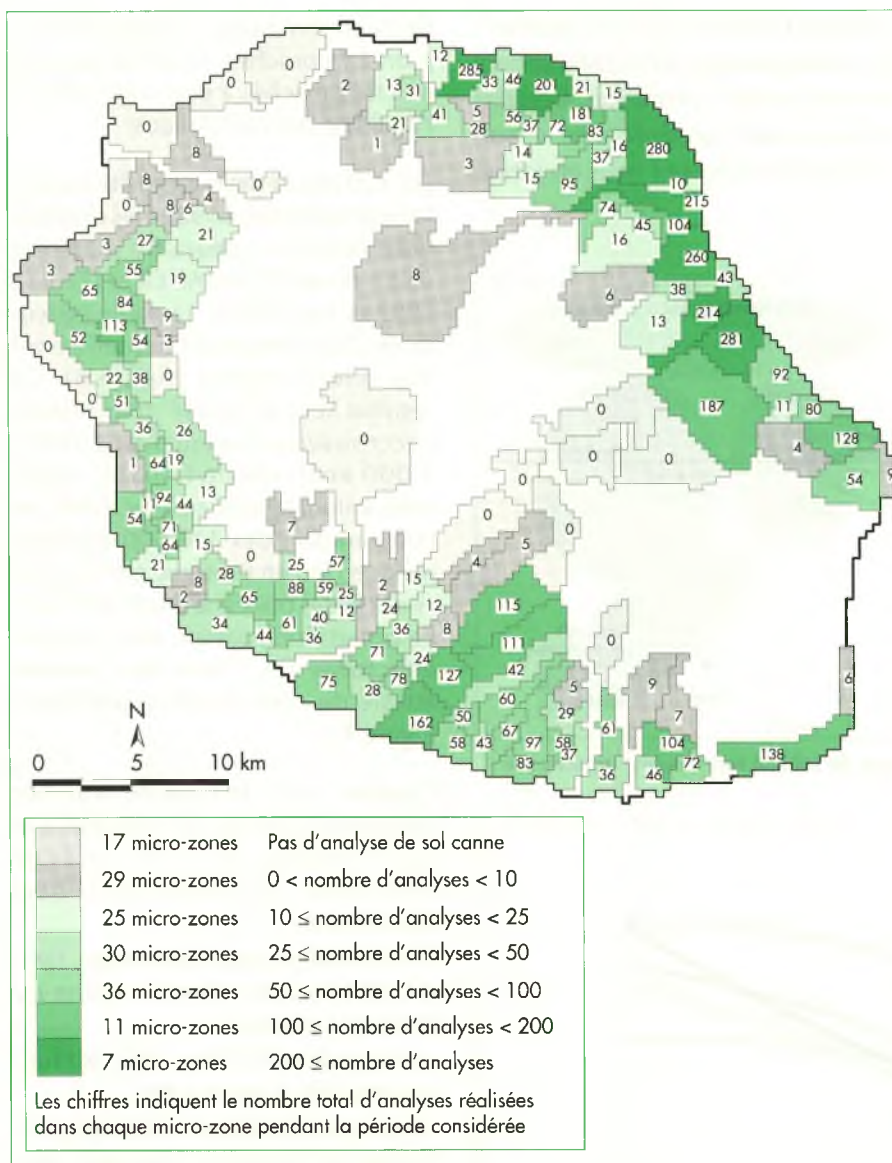


Figure 4. Répartition de 7 553 analyses de sol sous canne réalisées depuis janvier 1991 dans les 155 micro-zones.

Elles définissent 5 classes qualitatives : très faible, faible, moyen, fort et très fort. La classe moyenne est le lieu d'une croissance « normale » des plantes. Les classes intermédiaires (faible et fort) constituent des zones de transition « à risque » avec les classes extrêmes qui correspondent à des problèmes de croissance. Ces seuils sont à la base du calcul des corrections minérales.

Les seuils sont soit fixés à partir de connaissances établies par la recherche (figure 5), soit calculés à partir des caractéristiques chimiques des unités de sol. Les données et informations utilisées sont :

- la distribution des valeurs des variables chimiques par unité de sol ;
- les résultats d'essais agronomiques, notamment ceux de FRITZ (1967), qui mettent en relation les caractéristiques chimiques du sol et des rendements en biomasse, ou ceux de CHABALIER *et al.* (1984), qui relient le taux de saturation en potassium de la CEC au type de sol et au rendement en sucre de la canne ;
- des informations bibliographiques ;
- les liens entre variables chimiques par unité de sol.

Les seuils des variables suivantes sont fixés : pH, rapport Mg/Ca, taux de saturation en potassium de la CEC (K % CEC), azote, phosphore total et phosphore assimilable. Les autres seuils sont calculés. La connaissance des relations entre le pH et le calcium (tableau 2) permet de déterminer les seuils en calcium. Les seuils

Tableau 3. Description des principales caractéristiques de fertilité par unité de sol.

| Unité de sol | Composantes principales de la fertilité chimique | | | | |
|------------------------|--|---|-------------------|---|------------------|
| | pH | P assimilable | Matière organique | Bases échangeables | CEC |
| Ferrallitique | 4,5 à 6 | Faible | Moyen à faible | Faible | < 10 mé/100g |
| Vertisol | autour de 7 | Faible | Faible | Riche en Ca et Mg (20 et 15 mé/100g) K variable | 25 à 35 mé/100g |
| Brun | 5 à 7 | Moyen à faible | Moyen à faible | Riche en Ca (de 5 à 20 mé/100 g) | 10 à 25 mé/100 g |
| Brun Andique | Caractéristiques intermédiaires entre sol brun et sol andique, ils présentent des caractéristiques chimiques moyennes en tout (presque centrés sur l'axe des ACP). | | | | |
| Andosol non perhydraté | 5 à 6 | Très variable | Fort à très élevé | | 3 à 10 mé/100g |
| Andosol perhydraté | pH-KCl > pH-eau | différent du type de sol précédent par l'humidité de travail très élevée. | | | |

en magnésium sont alors déduits de la relation optimale classique : $\text{Ca/Mg} = 2$. Les seuils de la CEC dérivent aussi de ceux du calcium à partir des liens entre ces deux variables (tableau 2). Les seuils du potassium proviennent de ceux de la CEC et de K \% CEC .

Les valeurs extrêmes des seuils calculés ont été le plus souvent ajustées pour les inscrire à l'intérieur des distributions des variables. L'erreur sur les calculs réalisés à partir des fonctions de régression s'accroît en effet lorsque l'on s'écarte des moyennes. En outre, comme le montre l'exemple des seuils du calcium (tableau 4), des ajustements ont été réalisés pour rendre les grilles cohérentes ou quantifier des résultats issus d'un nombre insuffisant de données.

L'élaboration d'une grille de seuil repose de fait sur des données expérimentales ajustées de manière plus ou moins empirique, afin que le résultat final — le conseil — présente une bonne cohérence technique et économique.

Principe du diagnostic de fertilité et du conseil

Le système expert traite les données analytiques qui lui sont fournies, il établit un diagnostic de fertilité et en déduit un conseil en fertilisation. Ce dernier se présente sous forme d'un bulletin (figure 6), qui résume le diagnostic de fertilité par un graphique et propose une fumure de correction du sol et un plan de fumure d'entretien de la culture. Les calculs des doses conseillées reposent sur les seuils et les besoins de la culture.

Pour chaque échantillon analysé, l'unité de sol et la grille des seuils qui lui correspond sont déterminées par les coordonnées géographiques. La classe qualitative des variables chimiques de l'échantillon en résulte. Un diagnostic de fertilité est alors construit en croisant les classes de fertilité en fonction des équilibres minéraux des sols. Un exemple de diagnostic et de conseil est développé pour l'amendement calcomagnésien de la canne à sucre. Nous avons limité les autres conseils — détaillés par ailleurs (POUZET *et al.*, 1998) — aux grands principes.

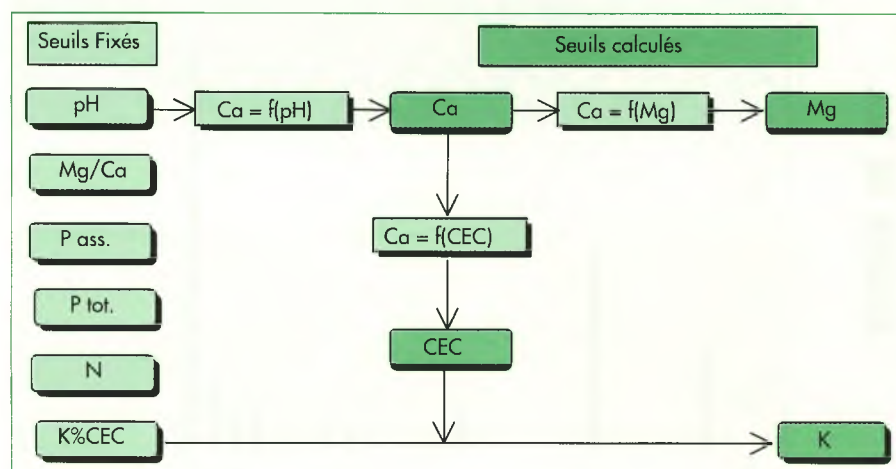


Figure 5. Origine des seuils d'interprétation des analyses de sol.

Tableau 4. Seuils du calcium (milliéquivalent/100 g).

| Caractère chimique | Unité de sol | Seuils de calcium (milliéquivalent/100 g) | | | | | | | | |
|--------------------|------------------------|---|-----|--------|-----|-------|-----|--------|----|-----------|
| | | Très faible | S1 | Faible | S2 | Moyen | S3 | Fort | S4 | Très fort |
| Ca (mé/100 g) | Ferrallitique | — | 2,8 | (3,3) | 5,5 | (6,5) | 8,0 | (9,4) | 10 | (14,5) |
| | Vertique | — | 0,5 | — | 1,5 | (1,4) | 5,0 | (3,4) | 22 | (23,3) |
| | Brun | — | 1,5 | (2,1) | 4,5 | (4,6) | 8,0 | — | 12 | — |
| | Brun andique | — | 3,0 | (2,3) | 6,0 | (6,5) | 10 | (10,7) | 12 | (19,0) |
| | Andique non perhydraté | — | 1,5 | (1,0) | 6,0 | (5,8) | 10 | (10,1) | 12 | (14,1) |
| | Andique perhydraté | — | 0,5 | (0,3) | 5,0 | (4,2) | 10 | (18,4) | 15 | — |

Les valeurs entre parenthèses indiquent les résultats du calcul lorsqu'ils diffèrent des valeurs seuil retenues.

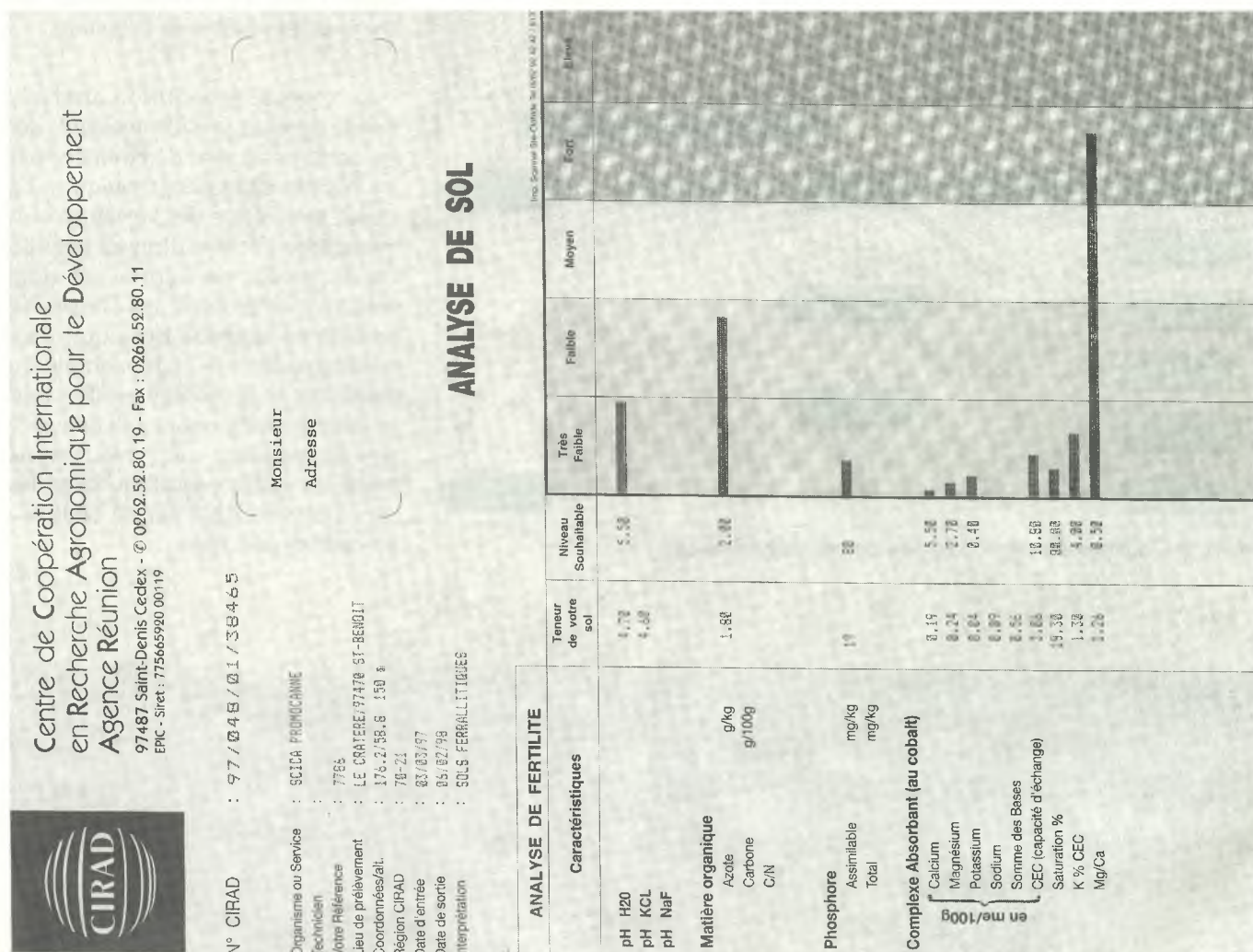


Figure 6. Exemple d'un bulletin d'analyse pour la canne à sucre.



Récolte des résidus de canne pour l'élevage (hauts de Saint-Pierre).

Cliché D. Pouzet

La fertilisation de la canne à sucre

Le cheminement du système expert entre l'analyse de sol et la proposition de plan de fumure est schématisé figure 7. Les conseils sont élaborés sur la base d'une production annuelle de 80 à 100 tonnes par hectare et une profondeur de sol à traiter de

30 centimètres pour tous les éléments sauf le phosphore. Celui-ci étant peu mobile, la profondeur de sol à corriger est limitée à 10 centimètres. La densité du sol est fixée arbitrairement à l'unité pour l'estimation de la masse de terre à traiter pour tous les éléments sauf l'azote. Dans ce dernier cas, la densité moyenne de chaque unité de sol est prise en compte (tableau 5).

Le chaulage

Le diagnostic prend en compte premièrement, le pH qui est une mesure physique du phénomène d'acidité, et deuxièmement, les principaux facteurs susceptibles de le modifier (Ca et Mg échangeable) et le rapport de ces deux bases (Mg/Ca). Le pH n'est pas un indicateur suffisant d'acidité du sol. Il ne traduit pas les phénomènes de libération d'ions aluminium dans le sol, et n'est pas directement corrélé avec le rendement d'une culture comme la canne à sucre (LYONNAZ-PERROUX, 1982). Les bases échangeables et la CEC sont analysées par la méthode à la cobaltihexamine, seule possible pour qualifier les sols à caractère andique, dont la CEC varie avec le pH.

Le sol est caractérisé à partir de seuils du pH et du calcium pour un

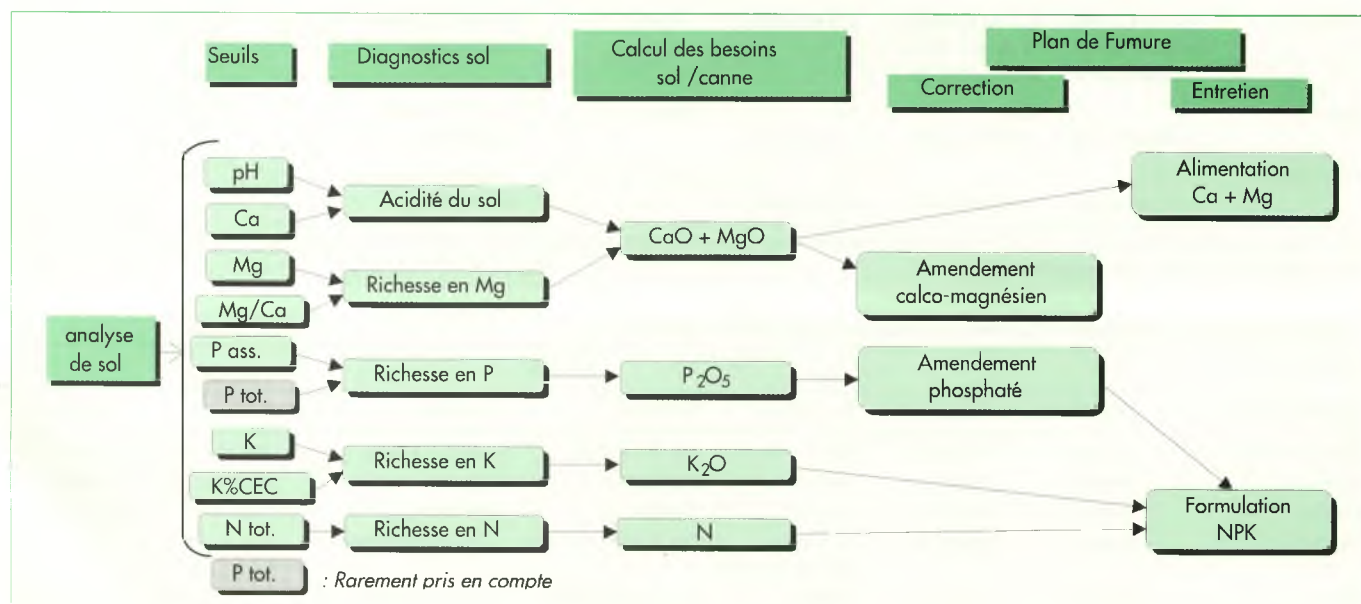


Figure 7. Organigramme de fonctionnement du système expert pour la canne à sucre.

Tableau 5. Densité apparente et coefficient de minéralisation des unités de sol réunionnaises.

| Unité de sol | Ferrallitique | Vertique | Brun | Brun andique | Andique | Andique perhydraté |
|---|---------------|----------|------|--------------|---------|--------------------|
| Densité apparente (kg/dm ³) | 1,2 | 1,4 | 1,3 | 0,9 | 0,8 | 0,8 |
| Coefficient de minéralisation | 2,0 | 2,8 | 2,5 | 1,8 | 1,0 | 1,0 |

Tableau 6. Diagnostic d'acidité.

| Variables | Niveau | Seuils du pH | | | | |
|-------------------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | Très faible | Faible | Moyen | Fort | Très fort |
| Seuils de Ca (mé/100 g) | Très faible | Très acide | Acide | Anormal 2 | Anormal 2 | Anormal 2 |
| | Faible | Acide | Acide | Normal | Normal | Normal |
| | Moyen | Anormal 1 | Peu acide | Normal | Normal | Basique |
| | Fort | Anormal 1 | Peu acide | Normal | Normal | Basique |
| | Très fort | Anormal 1 | Peu acide | Normal | Normal | Basique |

Tableau 7. Diagnostic de fertilité du sol en Magnésium.

| Variables | Niveau | Seuils de Mg | | | | |
|-----------------|-------------|--------------|---------|---------|---------|------------|
| | | Très faible | Faible | Moyen | Fort | Très fort |
| Seuils de Mg/Ca | Très faible | Très carencé | Carencé | Anormal | Anormal | Anormal |
| | Faible | Très carencé | Faible | Normal | Normal | Normal |
| | Moyen | Carencé | Normal | Normal | Normal | Normal |
| | Fort | Carencé | Normal | Normal | Normal | Riche |
| | Très fort | Carencé | Normal | Normal | Riche | Très riche |



Canne épaillée à Sainte Suzanne (variété R579).

Cliché D. Pouzet

Tableau 8. Conseil en amendement calco-magnésien pour la canne à sucre.

| Diagnostic (Fertilité en Mg) | Acidité | | | | | | |
|---------------------------------|---|---|------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Très Acide | Acide | Peu Acide | Normal | Basique | Anormal 1 | Anormal 2 |
| Très Carencé | Ca+Mg Indispensable | Ca+Mg Indispensable | Ca+Mg riche en Mg recommandé | Mg indispensable | Mg indispensable | Ca + Mg riche en Mg recommandé | Ca + Mg indispensable |
| Carencé | Ca+Mg Indispensable | Ca+Mg souhaitable | Ca+Mg riche en Mg recommandé | Mg indispensable | Mg indispensable | Ca+Mg riche en Mg recommandé | Ca + Mg riche en Mg recommandé |
| Faible | Ca+Mg Indispensable | Ca+Mg souhaitable | Ca+Mg souhaitable | Mg entretien | Mg entretien | Ca+Mg riche en Mg recommandé | Ca + Mg riche en Mg recommandé |
| Normal | Ca ou Ca+Mg si dose < 3 t indispensable | Ca ou Ca+Mg si dose < 3 t indispensable | Ca entretien | Rien | Eviter les plantes acidophiles | | |
| Riche | Ca indispensable | Ca indispensable | Ca souhaitable | Rien | Eviter les plantes acidophiles | | |
| Très riche | Ca indispensable | Ca indispensable | Ca souhaitable | Rien | Eviter les plantes acidophiles | | |

Ca, chaux ou carbonate de calcium ; Ca+Mg, chaux magnésienne ; Ca+Mg riche en Mg, chaux magnésienne avec plus de 30 % de MgO ; Mg, Kieselérite ou sulfate de magnésium.

Tableau 9. Doses recommandées d'apport calco-magnésien sur canne à sucre

| Diagnostic (Fertilité en Mg) | Acidité | | | | | |
|---------------------------------|------------|--------|-----------------------------|------------------|------------------|-----------|
| | Très Acide | Acide | Peu Acide | Normal | Basique | Anormal 1 |
| Très carencé | Normal | Normal | Mg S1 | Mg (S1 + 0,5) | Mg (S1 + 0,5) | Mg S1 |
| Carencé | Normal | Normal | Mg S1 | Mg (S1 + 0,5) | Mg (S1 + 0,5) | Mg S1 |
| Faible | Normal | Normal | Mg S2 | Normal | Normal | Mg S2 |
| Normal | Normal | Normal | 500 kg/ha tous les 3 ans | Pas d'amendement | Pas d'amendement | |
| Riche | Normal | Normal | Normal | Pas d'amendement | Pas d'amendement | |
| Très riche | Normal | Normal | Normal | Pas d'amendement | Pas d'amendement | |

diagnostic d'acidité (tableau 6). Un diagnostic de richesse en magnésium est effectué parallèlement, à partir des valeurs prises par les variables Mg et Ca/Mg (tableau 7). Le croisement de ces deux diagnostics conduit à 14 situations indexées à un dictionnaire de phrases dont le contenu est résumé tableau 8. Les doses sont calculées par ajustement du sol sur les seuils du calcium ou du magnésium selon les indications du tableau 9 où :

– N signifie calcul normal. La dose comble l'écart entre le niveau S2 du calcium et le niveau existant pour les 3 000 tonnes par hectare de terre à traiter ;

– Mg S1 indique que le calcul prend en compte le seuil S1 du magnésium au lieu du seuil du calcium ;
– Mg S2 indique que le calcul fait intervenir le seuil S2 du magnésium ;
– Mg (S1 + 0,5) prend en compte une valeur intermédiaire entre les seuils S1 et S2 du magnésium, qui est égale au seuil S1 augmenté de 0,5 milli-équivalent de Mg.

La dose est traduite en amendement calcaire, magnésien ou calcomagnésien selon les caractéristiques de l'échantillon (tableau 8). Le système s'appuie sur les teneurs en CaO et MgO des amendements commerciaux disponibles pour élaborer le conseil. Les doses sont ajustées par un coefficient d'activité de 1,2 (pertes par lixiviation) et modulées par des seuils d'apports (minimum respectif de 500 et 300 kilogrammes par hectare et par an de CaO et de MgO).

Le conseil est en cours d'aménagement pour en accroître la portée technique et répondre aux demandes des utilisateurs. Le premier point correspond à la substitution de la chaux vive calco-magnésienne agglomérée par du calcaire dolomitique broyé. Le second à une réduction des doses conseillées qui, économiquement irréalistes dans les zones très acides, conduisent à discréditer l'ensemble du conseil. Les tendances du conseil en chaulage par micro-zones sont cartographiées pour le développement (figure 8).

L'azote sur canne à sucre

Le conseil en fertilisation azotée rend compte de la capacité du sol à libérer de l'azote par minéralisation de sa matière organique (MEYER *et al.*, 1986). La quantité potentielle d'azote minéralisable N_{\min} (kilogrammes par hectare) dans les 30 centimètres de sol est calculé selon la formule :

$$N_{\min} = C_m \times d_a \times N_t \times 0,3 \times 10^4$$

où C_m est le taux de minéralisation exprimé en pourcent de N_t , d_a est la densité apparente en kilogrammes par décimètres cubes ; N_t est l'azote total en grammes par kilogrammes et $0,3 \times 10^4$ un coefficient lié à la

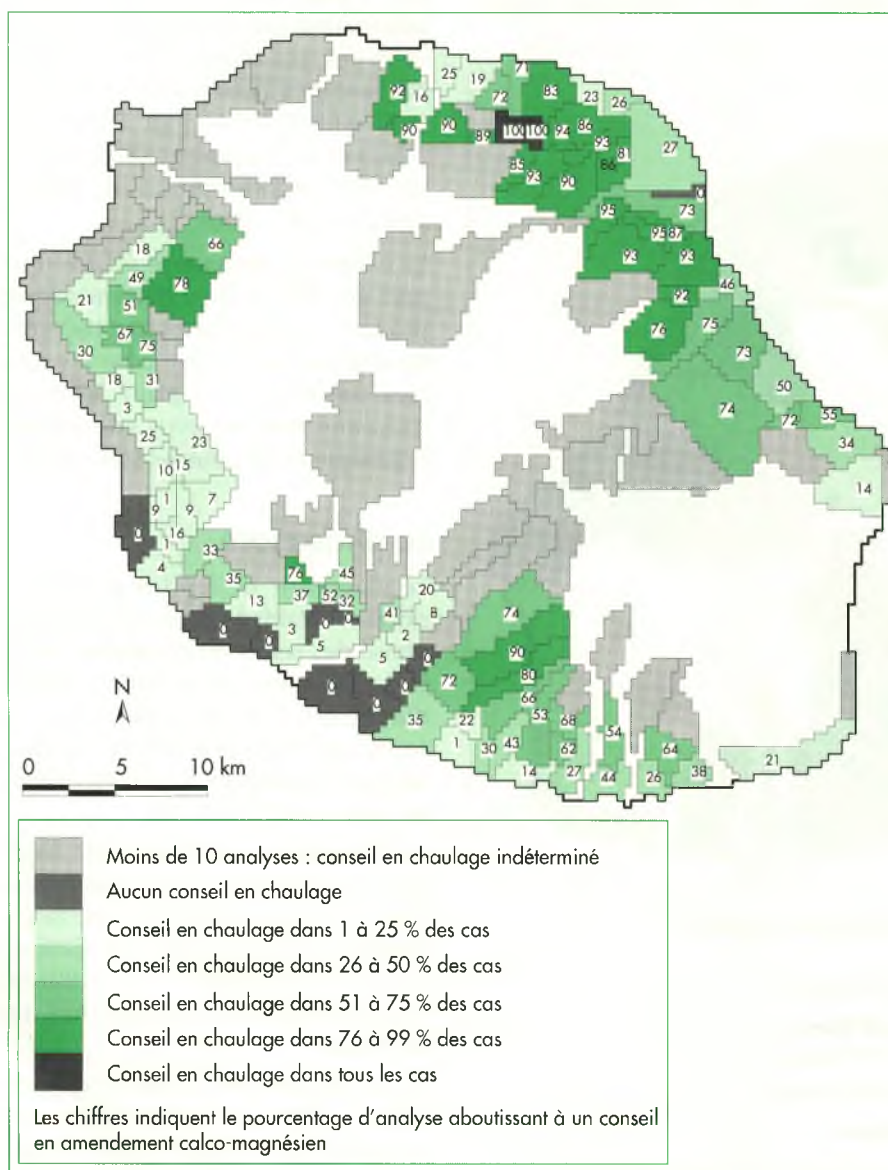


Figure 8. Répartition des conseils en amendement calco-magnésien des sols sous canne.

masse de sol. Les taux de minéralisation des principales unités de sol réunionnaises (tableau 5) ont été déterminés par CHECKOURI (1990) et FRITZ (1973). Les valeurs de d_a sont celles de CLARION (1991) pour les sols ferrallitiques, et de PERRET (1989, 1993) pour les autres sols.

Faute d'élément pour les chiffrer, les pertes d'azote par lixiviation et dénitrification ne sont pas prises en compte dans ce raisonnement. Il en va de même de paramètres tels que la température et l'humidité, qui conditionnent la minéralisation. Cependant, les phénomènes de lixiviation sont limités sous canne à sucre, même en climat très humide et avec de l'azote nitrique (TAKAHASHI, 1968 ; NG KEE KWONG et DEVILLE, 1987 ; TSAI *et al.*, 1992).

La dénitrification, importante lorsque le climat alterne des périodes sèches et humides (FRENEY *et al.*, 1992), ne concerne que l'urée épandue en surface (BIGGS *et al.*, 1996), situation rare à la Réunion. Le développement de la coupe en vert pourrait néanmoins s'accompagner de pertes d'azote de 40 à 50 % en cas d'utilisation d'urée (WOOD *et al.*, 1989).

La fourniture théorique d'azote par le sol est reliée aux besoins de la culture. Les seuils (S) sont ceux qui permettent au sol de fournir à la canne une quantité Q d'azote de 75, 150, 225 et 300 unités par hectare :

$$S = Q / (C_m \times d_a \times 0,30 \times 10^4)$$

Les doses conseillées intègrent une efficacité de 50 % des engrais azotés. Cette valeur constitue une approximation, qui relève notamment des taux d'utilisation de l'azote par la canne déterminés à Maurice (NG KEE KWONG et DEVILLE, 1992) et en Australie (KEATING *et al.*, 1993 ; CHAPMAN *et al.*, 1994 ; VALLIS *et al.*, 1996).

Le système positionne le sol par rapport aux seuils ainsi déterminés et propose 3 doses d'apports : 160 unités d'azote par hectare pour les sols très pauvres, 120 pour les sols moyennement pourvus en matière organique et 80 pour les sols riches.

Le phosphore

Le diagnostic de fertilité phosphorique est établi à partir d'un tableau croisé des seuils du phosphore total et du phosphore assimilable ; mais le diagnostic courant repose sur les seuls seuils du phosphore assimilable. Le phosphore total n'est analysé qu'en cas d'anomalies.

Le phosphore assimilable est dosé par la méthode Olsen modifiée Dabin, la mieux adaptée à une large gamme de sols tropicaux (ROCHE *et al.*, 1978 ; ROCHE *et al.*, 1980) et bien corrélée à la production de biomasse.

En cas de forte déficience (P assimilable < S1) une correction est conseillée pour amener 1 000 tonnes par hectare de sol au seuil moyen inférieur (S2). Les conseils en correc-

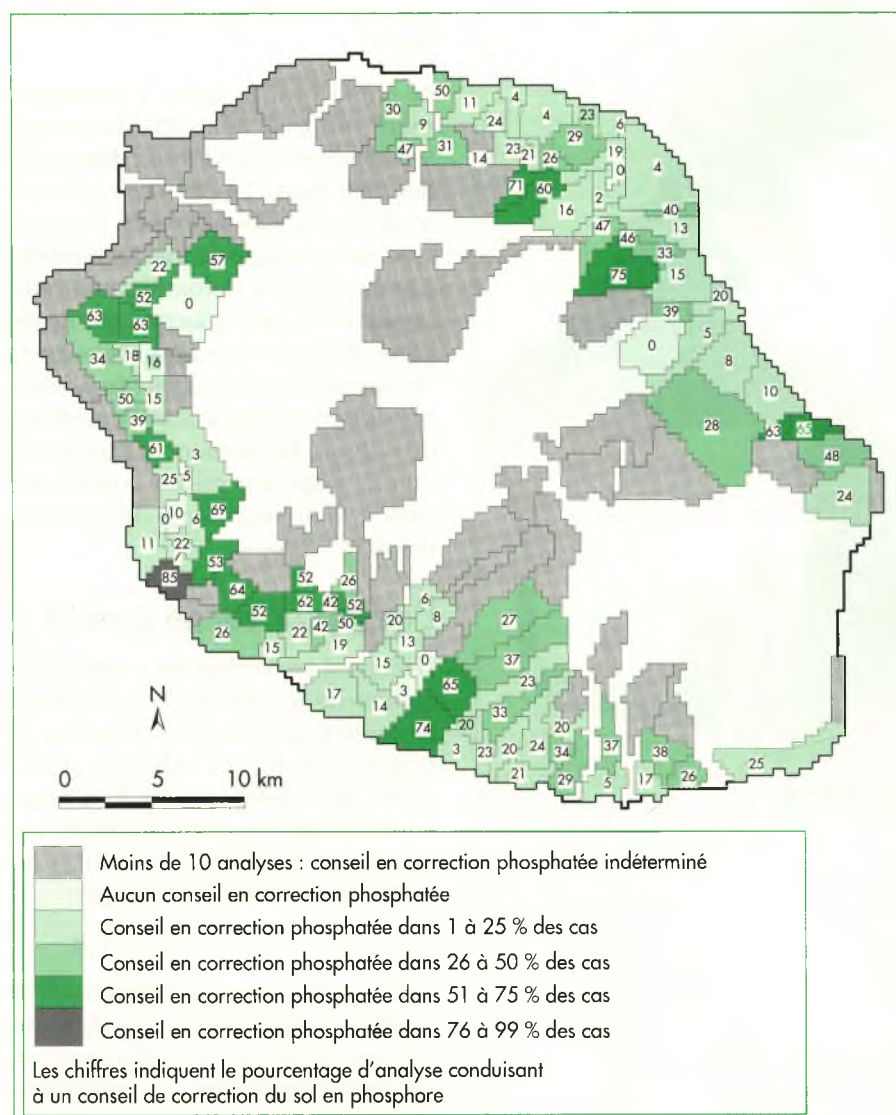


Figure 9. Répartition des conseils en correction phosphatée des sols sous canne.

tion sont synthétisés sous forme de carte à l'usage du développement (figure 9).

Les conseils en fertilisation phosphatée d'entretien sont simplifiés, en raison des faibles exigences en phosphore de la plante. Trois situations sont prises en compte. Un apport de 200 unités de P_2O_5 par hectare est conseillé pour les sols légèrement déficients. Cet apport est limité à 70 unités dans les zones correctement pourvues en phosphore. Il est aussi conseillé dans les zones très fortement carencées qui ont reçu une correction préalable. Aucun apport n'est proposé lorsque les sols sont très riches en phosphore.

Le potassium

Le diagnostic de fertilité potassique est évalué à partir d'un tableau croisé des seuils du potassium et du taux de saturation de la CEC (tableau 10).

Trois niveaux d'apports sont conseillés : 0, 200 ou 400 unités de

K_2O , selon que le diagnostic de fertilité indique un sol très riche, moyennement riche ou carencé en potassium.

Le plan de fumure sur canne à sucre

Les conseils sont synthétisés sous la forme d'un plan de fumure. Le programme traite d'abord les corrections du sol (chaulage, phosphore). Il recherche ensuite les formules d'engrais les mieux adaptées aux doses d'entretien calculées. Le support de cette recherche est une liste actualisée des engrais du marché. Une préférence est donnée aux formulations ternaires grâce à une marge d'ajustement de 10 % entre les doses calculées et les teneurs des formulations commerciales. Le complément par un engrais simple n'intervient que si cette marge ne peut être respectée. Le bulletin, envoyé par voie postale aux agriculteurs, précise que les conseils

Tableau 10. Conseil en fertilisation potassique de la canne à sucre.

| Diagnostic (K % CEC) | Potassium | | | | |
|-------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Très Faible | Faible | Moyen | Fort | Très Fort |
| Très Faible | Entretien renforcé | Entretien renforcé | Entretien normal | Anomalie | Anomalie |
| Faible | Entretien renforcé | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal |
| Moyen | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal |
| Fort | Anomalie | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal |
| Très Fort | Anomalie | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal | Pas d'entretien |



Coupe manuelle de la canne (Le Cratère, Hauts de Saint Benoit).

Cliché D. Pouzet

concernent une production de 80 à 100 tonnes par hectare, et ils doivent par conséquent être adaptés en proportion du rendement escompté. Le plan de fumure ne propose pas de fractionnement de l'azote, même en cas d'une irrigation goutte à goutte, en raison de l'absence d'effet sur le rendement (CHAPMAN, 1996 ; NG KWONG et DEVILLE, 1992 ; NG KEE KWONG, 1995). L'utilisation d'un engrais ternaire est donc justifiée. Une exception est faite cependant pour les cannes vierges, où un apport d'urée est préconisé 2 à 3 mois après plantation pour tenir compte de la vitesse d'établissement de la culture et optimiser la production (CALCINO et BURGESS, 1995).

La fertilisation des graminées fourragères

Le conseil en fertilisation des fourrages concerne les graminées qui, semées ou repiquées, dominent largement la flore pastorale subtropicale de la Réunion (kikuyu, dactyle, ray gras, fétuque élevée, chloris et brome cathartique). En outre, la majorité des fourrages sont cultivés en zone d'altitude, où les sols sont presque exclusivement de nature andique, ce qui simplifie la démarche de diagnostic (figure 10).

La fertilisation d'entretien des fourrages (Cirad *et al.*, fiches 1 à 4, 1988) est établie d'une part pour une production semi-intensive (6 à 8 tonnes par hectare et par an de matière sèche) et, d'autre part, pour une production intensive (10 à 12 tonnes par hectare et par an). Ces niveaux correspondent à des charges respectives de 1,5 et de 2,5 vaches par hectare ou des fourchettes de 4 à 7 ou de 7 à 9 coupes annuelles. Le niveau intensif est employé par défaut si la demande de conseil est incomplète.

Amendement

Les conseils en amendement et en entretien calco-magnésien ainsi qu'en amendement phosphaté sont identiques à ceux de la canne à sucre. Cette similitude est cependant provisoire. Des études en cours, du Cirad-Réunion, tendent en effet à reconsidérer les diagnostics du phosphore et du calcium pour les prairies localisées sur des andosols d'altitude.

Entretien

La dominance d'une unité de sol permet dans le cas des fourrages de ne prendre en compte que les besoins de la culture pour l'entretien en azote et en phosphore. Les quantités fournies par le sol pour ces deux éléments sont considérées comme constantes. Les doses sont donc établies en fonction du rendement (Cirad *et al.*, fiche 1, 1988).

Le conseil d'entretien potassique dépend du sol. Il est en effet nécessaire de comptabiliser les disponibilités potassiques pour limiter les consommations de luxe et éviter une trop forte teneur des fourrages. Le domaine d'application des conseils est différent de celui de la canne (tableaux 10 et 11), en raison du rôle particulier du potassium dans la synthèse du sucre.

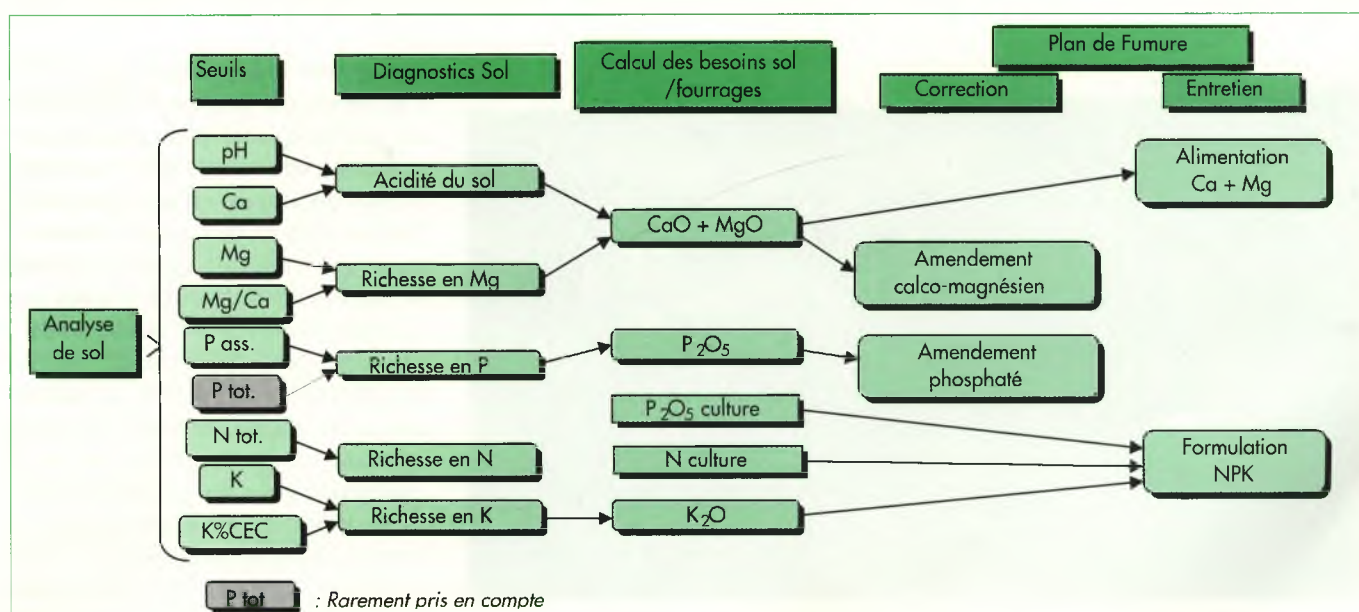


Figure 10. Organigramme des conseils pour les graminées fourragères.

Tableau 11. Conseil en fertilisation potassique des graminées fourragères.

| Diagnostic K % CEC. | Diagnostic potassium | | | | |
|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| | Très Faible | Faible | Moyen | Fort | Très Fort |
| Très Faible | Entretien renforcé | Entretien renforcé | Entretien renforcé | Entretien renforcé | Entretien normal |
| Faible | Entretien renforcé | Entretien renforcé | Entretien renforcé | Entretien renforcé | Entretien normal |
| Moyen | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal | Entretien réduit |
| Fort | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal | Entretien normal | Entretien réduit |
| Très fort | Entretien normal | Entretien normal | Entretien réduit | Entretien réduit | Entretien réduit KCEC > 20 % contamination |

Tableau 12. Conseil en fertilisation d'entretien des fourrages.

| Diagnostic potassique | Production extensive | Production intensive |
|-----------------------|---|---|
| Sol carencé | 190 N – 60 P ₂ O ₅ – 420 K ₂ O | 380 N – 90 P ₂ O ₅ – 590 K ₂ O |
| Sol normal | 190 N – 60 P ₂ O ₅ – 320 K ₂ O | 360 N – 90 P ₂ O ₅ – 490 K ₂ O |
| Sol riche | 190 N – 50 P ₂ O ₅ – 210 K ₂ O | 380 N – 70 P ₂ O ₅ – 320 K ₂ O |

Six conseils d'entretien combinant le diagnostic potassique et le degré d'intensification sont proposés (tableau 12). Ils sont assortis, comme pour la canne, d'un plan de fumure proposant des engrais du commerce et d'un calendrier d'apport adapté à la fréquence des coupes et aux grandes saisons climatiques.

Les études en cours à la Réunion (BLANFORT et THOMAS, 1997) tendent à compléter le diagnostic sol par un indice de nutrition minérale des fourrages, qui repose sur une analyse chimique de la biomasse produite (SALETTE et HUCHE, 1991 ; DURU, 1992). Ceci permettra d'améliorer le conseil en évaluant la capacité réelle d'accès de la culture aux réserves du sol. En effet, ces réserves sont évaluées à partir d'hypothèses normatives d'homogénéité des unités de sol, des profils et des profondeurs de sol et d'enracinement qui ne rendent compte que partiellement de la réalité.



Culture fourragère intensive de chloris (LEP de Saint Joseph).

Cliché D. Pouzet

La fertilisation de l'ananas

L'ananas est une culture intensive implantée le plus souvent sur des sols ferrallitiques plus ou moins andiques de l'île en rotation avec la canne à sucre. Le conseil en fertilisation (figure 11) est conçu à partir d'études du Cirad (BOUFFIN *et al.*, 1987 ; Irfa *et al.*, 1992a). Culture de sols acides sensible au fer, peu exigeante en phosphore, sa forte production de biomasse s'accompagne de mobilisations minérales instantanées importantes. Les apports de fertilisants sont donc fractionnés et indépendants des réserves du sol. Le sol n'est pris en compte qu'en cas de fortes déficiences.

Amendements

Contrairement à la canne et aux fourrages, dont la production est affectée par des pH inférieurs à 5, l'optimum de production de l'ananas se situe entre 4,5 et 5,5. L'amendement du sol, qui vise ces valeurs, est évalué directement à partir du pH et du rapport Mg/Ca. Les sols dont le pH est égal ou supérieur à 6 sont considérés comme non adaptés à la culture.

Les corrections phosphatées diffèrent aussi de celles des autres cultures, car l'ananas n'est pas très exigeant en phosphore. Elles ne sont ainsi proposées que lorsque le phosphore assimilable est inférieur au seuil S1 (niveau très faible). Contrairement aux autres cultures, aucune correction n'est proposée pour le niveau faible (entre S1 et S2).

Entretien

La richesse du sol en potassium n'intervient pas pour le calcul de la fumure potassique d'entretien. Cependant, afin d'éviter tout accident qui résulterait du non respect des doses proposées, le bulletin met en garde l'agriculteur d'un risque trophique, lorsque le sol se révèle très carencé en potassium. Aucun entretien phosphaté n'est conseillé. La fertilisation azotée ne prend pas non plus en compte les réserves du sol. Il est cependant recommandé sur le bulletin de restituer systématiquement les résidus de culture. Les fertilisations azotée et potassique sont liées par la relation $(K_2O / N) \leq 1,5$, que l'on conseille aux agriculteurs de respecter à chaque apport.



Culture d'ananas en rotation avec de la canne (Bois de Nèfles, Saint Denis).
Cliché D. Pouzet

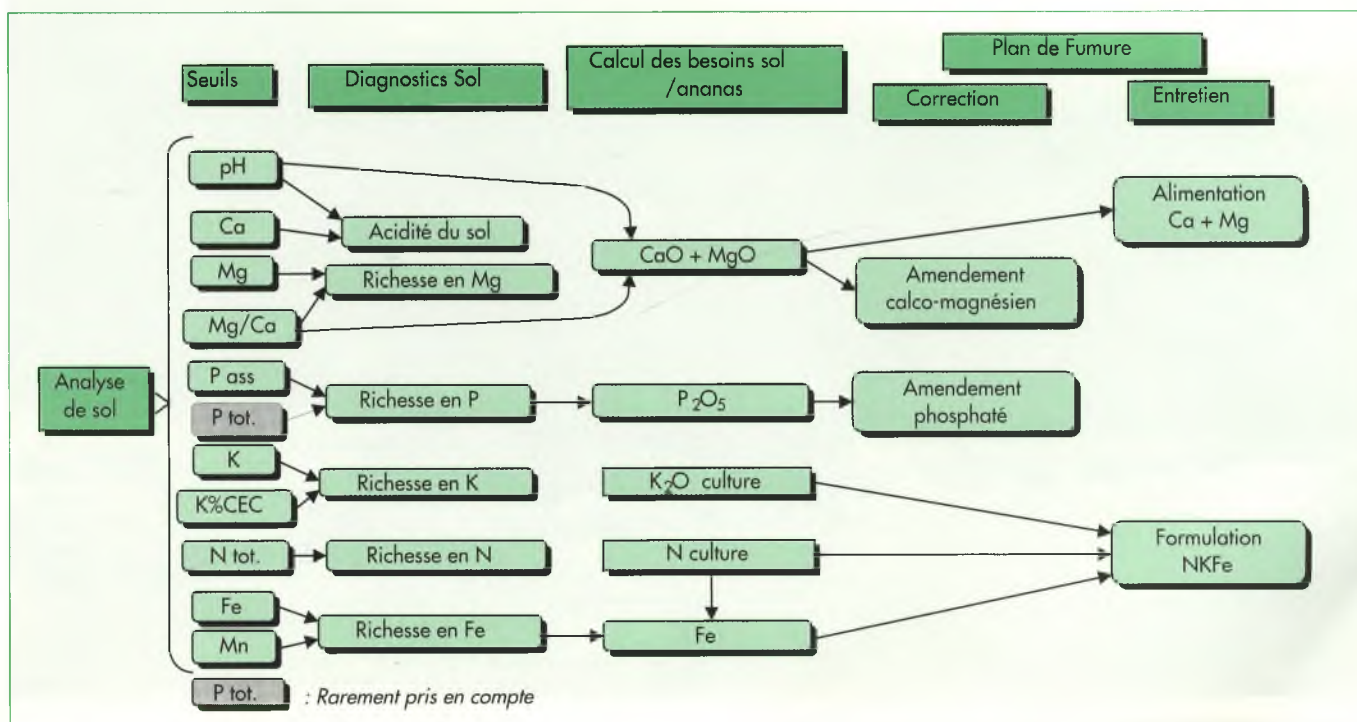


Figure 11. Organigramme des conseils pour l'ananas.



Culture de babanier (Commune Ango, Sainte Suzanne). Cliché D. Pouzet

L'alimentation ferrique repose sur les teneurs en fer et en manganèse du sol et le rapport entre ces deux éléments. Un apport de fer, sous forme de pulvérisation foliaire, est conseillé si Fe et Mn sont supérieurs aux seuils de carence et si leur rapport est inférieur à 1,5, $(Fe/Mn) < 1,5$.

Le plan de fumure est proposé avec un calendrier d'apports lié au cycle de la culture (biomasse produite et floraison).

La fertilisation du bananier

Le diagnostic de fertilisation se fonde principalement sur des recherches du Cirad (MARTIN-PREVEL *et al.*, 1963 ; Irfa *et al.*, 1992b) et les résultats d'études conduites en Guadeloupe par l'Irfa et la Sica Assobag (DESERT, 1980 ; BOURGADE, 1986 ; Anonyme, 1983). Des informations complémentaires proviennent de tests non publiés conduits à la Réunion par CHABALIER à la demande de la Sica Banane, pour améliorer la qualité des fruits. Comme l'ananas, la culture intensive du bananier impose l'apport régulier d'importantes quantités de fertilisants.

Amendements

Le diagnostic et le conseil en chaulage (figure 12) sont identiques à ceux de la canne à sucre. Cependant, quel que soit le diagnostic sol, le risque d'acidification rapide inhérent à la culture est systématiquement rappelé sur le bulletin d'analyse, qui préconise des apports calco-magnésiens réguliers.

La correction phosphatée du sol est en tout point comparable à celle de la canne.

Le bananier est une culture très exigeante en potassium. Le programme calcule donc la teneur souhaitée du sol en cet élément après correction du pH.

Les doses correction sont calculées comme suit :

- la CEC mesurée est comparée à la somme Ca + Mg échangeable théoriquement atteinte après chaulage. La plus grande des deux valeurs est retenue. Cette approche tient compte du fait que la grande majorité des sols réunionnais aptes à la culture du bananier sont à charge variable et subissent des modifications de la CEC avec la correction du pH ;
- une première estimation de la teneur souhaitable en potassium est alors obtenue en prenant 6 % de la valeur précédente. L'alimentation

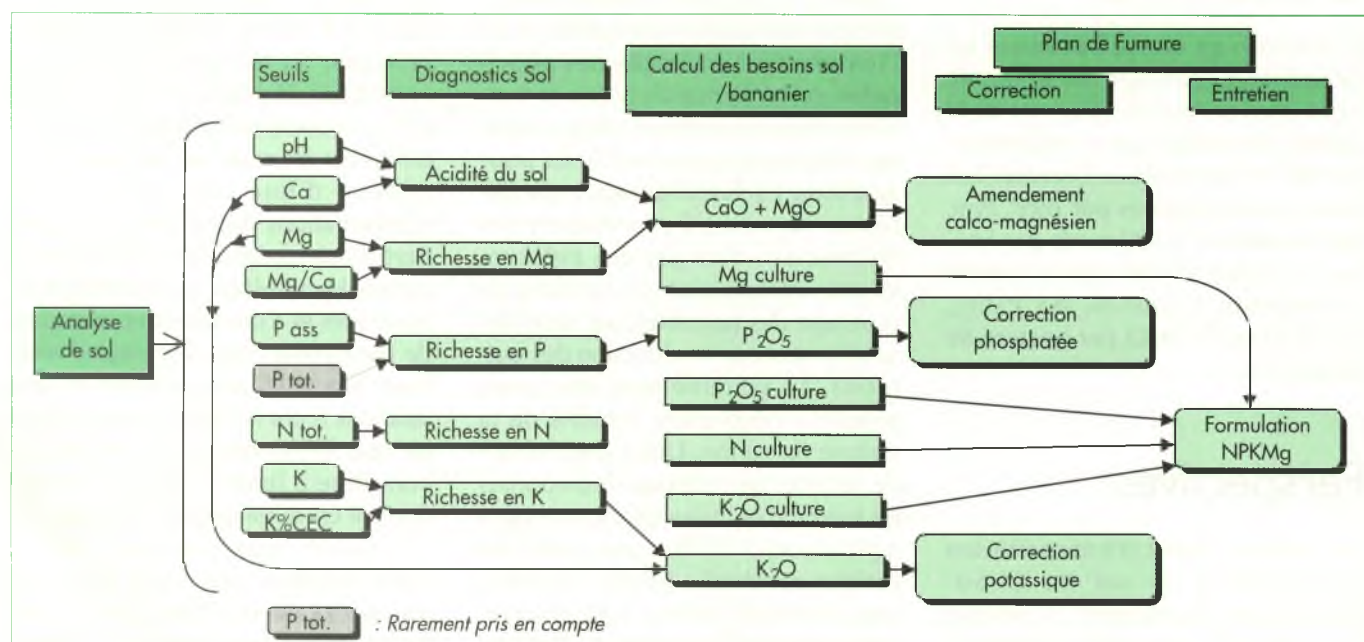


Figure 12. Organigramme des conseils pour le bananier.

potassique du bananier nécessite en effet que K représente au moins 6 % de la CEC effective ;

– l'apport maximum de potassium ne doit pas dépasser 70 % de la teneur en magnésium après chaulage.

L'apport de potassium conseillé correspond à la première estimation avec la seconde comme valeur maximum. Le résultat obtenu débouche sur trois niveaux de proposition. Aucun d'apport n'est envisagé si le calcul conduit à une dose inférieure à 60 unités de potasse. La dose calculée « arrondie » est conseillée, si elle se situe entre 60 et 300 unités. Au delà de 300 unités, le conseil est limité à cette dernière valeur pour éviter les risques de salinité et de brûlure.

Entretien

Une fois les corrections du pH, du phosphore et du potassium effectuées, la fumure d'entretien NPK de la culture est uniquement déterminée par les estimations de production. Les réserves du sol ne sont pas prises en compte.

Une fertilisation d'entretien en magnésium est conseillée pour tenir compte de l'exigence de la culture pour cet élément. Elle considère la production de la plante, sans présumer des réserves du sol.

Le bulletin de conseil propose un calendrier d'épandage de la fumure d'entretien en fonction du cycle de la culture. Il est établi pour une production de 40 tonnes par hectare. Les doses sont calculées par pied avec une densité de 2 000 pieds par hectare. L'apport annuel total conseillé correspond à 280 N, 85 P₂O₅, 570 K₂O et 30 MgO par hectare de bananeraie.

Perspectives

Le système expert d'interprétation des analyses de sol du Cirad-Réunion est fonctionnel. Il produit l'ensemble des conseils en fertilisation, diffusés depuis une dizaine

d'années dans l'île pour les cultures de canne à sucre, de graminées fourragères, d'ananas et de bananier. Le laboratoire du Cirad gère ainsi les demandes émanant des trois quarts de la surface agricole utile de l'île. Les 2 000 à 3 000 bulletins d'analyse délivrés tous les ans font référence. Ainsi, la partie fumure de correction du conseil a été utilisée comme critère d'attribution d'une prime régionale supplémentaire à la plantation de la canne à sucre pour la campagne 1997-1998. Cet outil est, à l'échelle de la Réunion, un support technique important des politiques d'accroissement de la productivité des soles cannières qu'imposent les réductions de surface. Il participe directement au maintien du patrimoine foncier à vocation agricole et au développement d'une agriculture reproductible.

L'enrichissement de la base de données permet d'envisager une amélioration périodique du diagnostic et des conseils en affinant la connaissance des sols. Les relations sol plante font aussi l'objet de mises au point régulières en fonction des résultats de la recherche. La prise en compte des demandes et des contraintes des agriculteurs autorise une optimisation des conseils. Il en est ainsi de l'évolution en cours des conseils en amendement calco-magnésien de la canne à sucre, des conseils en correction des soles fourragères et de l'introduction envisagée des principales cultures maraîchères et fruitières dans le système. Notons enfin les efforts soutenus du Cirad pour améliorer l'échantillonnage et la diffusion du conseil : formation des techniciens chargés des prélèvements, introduction de système de repérage des parcelles par satellite, amélioration de la rédaction des bulletins. Le système doit être aussi adapté à l'évolution actuelle de la culture de canne. Une forte demande récente de l'élevage réunionnais en fourrage et litière conduit certains agriculteurs à récolter une partie des résidus de récolte (choux, feuilles) sous forme de balles. Les exportations minérales deviennent ainsi très supérieures à celles retenues pour le

calcul des fumures d'entretien en phosphore et surtout en potassium. Les conseils devront être dans ce cas réévalués à la hausse. La récolte complète d'une parcelle à fort rendement peut exporter plus de 600 kilogrammes par hectare de K₂O.

Des actions soutenues sont développées pour valoriser les données stockées par le laboratoire, notamment à l'aide d'outils cartographiques. L'ensemble des informations constituées par les diagnostics de fertilité, les contraintes édaphiques (pente, épaisseur, pierrosité), les données climatiques et le niveau d'intensification, permettent de mieux caractériser les sols. Des indicateurs de gestion durable des sols à l'échelle parcellaire s'appuyant sur des seuils pourraient en découler. Ce travail devrait permettre d'accéder à une meilleure connaissance du milieu agricole de l'île et faciliter ainsi le développement de techniques aptes au maintien et à l'amélioration de la fertilité. La cartographie systématique des parcelles de canne pour l'attribution des primes à la replantation permettra à terme de compléter la base de données par les surfaces et les rendements, améliorant considérablement la portée agronomique de l'outil.

Le système n'est pas transposable en l'état à d'autres situations géographiques, où les unités de sol, les conditions climatiques, les cultures et l'environnement économique sont différents de ceux de la Réunion. Il dépend d'une part des sources d'informations disponibles et d'autre part d'approximations destinées à ajuster les résultats aux réalités économiques et à combler des manques de connaissances scientifiques relatives aux sols, aux cultures et aux relations entre les deux. Il est évident qu'une forte pression de recherche contribue à limiter ces approximations. Il est aussi évident que plus les conditions économiques seront contraignantes, plus il sera fait appel aux stocks du sol et aux possibilités de restitution pour assurer l'alimentation minérale des cultures.



Bananiers, ananas et canne à sucre
(Haut de Sainte Suzanne).
Cliché D. Pouzet

Les fondements du système sont aussi liés aux méthodes d'analyse des sols mises en œuvre, notamment pour la CEC et le phosphore assimilable, deux méthodes différentes utilisées pour l'analyse d'un élément n'aboutissant pas forcément à des résultats corrélés.

Toute analyse de sol fait l'objet d'une interprétation, qui implique l'existence de clefs d'interprétation et l'élaboration possible d'un système expert. Celui-ci va constituer un outil de réflexion et d'amélioration du conseil. Le système réunionnais peut servir de canevas, d'exemple ou de modèle à la construction de versions adaptées aux sols et aux cultures spécifiques à d'autres sites. Les grilles d'interprétation de la fertilité des sols réunionnais sont adaptables à partir de résultats locaux d'essais de fertilisation et de connaissance des sols. Ce travail doit être réalisable notamment en Afrique de l'Ouest où nous disposons de synthèses agronomiques (PIERI, 1989) et de nombreuses études pédologiques et morphopédologiques. La transposition à Mayotte et aux Comores est facilitée par la proximité de certains types de sol (BROUWERS, 1973 ; LATRILLE, 1975, 1977, 1981), mais le conseil devra être adapté aux cultures spécifiques de ces îles et à l'environnement économique et notamment aux possibilités d'utilisation d'engrais minéraux.

Le système a été appliqué à la canne à sucre dans la région de Xalapa au Mexique (CHABALIER, 1991). Les sols et le climat y sont très proches de ceux de la Réunion (KILLIAN, 1987). Le programme s'appuie sur le

modèle de SNOECK et JADIN (1990) écrit par B. SALLEE du Cirad) pour le caféier. Son développement n'a pas pu être suivi par le Cirad, mais les premiers résultats indiquaient une amélioration possible et intéressante des conseils en fertilisation et des formules NPK employées de façon standard et uniforme.

Bibliographie

- Agreste, 1984. La statistique agricole. Annuaire de statistique agricole, la Réunion, année 1993. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Paris, France. 60 p.
- Anonyme, 1983. Fertilité chimique et fertilisation. Programme d'agronomie, chambre d'agriculture de l'Aisne et de la Saône et Loire. Poly., 92 p.
- ANGE A., 1974. Plaine des Palmistes. Etude morphopédologique. Cartes au 1/25 000. Cirad-Irat, 65 p.
- BERTRAND R., 1972. Compte rendu provisoire de mission pédologique, Cirad-Irat n° 52, 32 p.
- BIGGS J.S., VALLIS I., KOROT S., KEATING B.A., 1996. Effects of depth of urea application on loss of nitrogen by volatilisation from acid soils ?. In Sugarcane : Research Towards Efficient and Sustainable Production. WILSON J.R., HOGARTH D.M., CAMPBELL J.A. et GARSIDE AL. (éditeurs). Csiro, Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane, Australie, p. 198-199.
- BLANFORT V., THOMAS P., 1997. Gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement. Bilan de deux années de suivi en exploitation. Cirad, AFP, région Réunion. Cirad-Réunion, 18 p.
- BOUFFIN J., DUCELIER D., juin 1987. Note technique. La culture de l'ananas Victoria pour l'exportation à la Réunion. Cirad-Irfa, Saint-Pierre, la Réunion, France. 11 p.
- BOURGADE, J., 1986. L'alimentation minérale du bananier. In Banane Information N° 42. 1^{er} trimestre 1986. Sica Assobag. Guadeloupe, p. 34-39.
- BROUWERS M., 1973. Anjouan, inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales (Archipel des Comores). Paris, France, Rapport Cirad-Irat, 3 fasc., rapport 101 p., annexes 336 p., 8 cartes.
- BROUWERS M., RAUNET M., 1981. Inventaire morphopédologique dans les hauts de la Réunion. Aptitude agricole des terres. Cirad-Irat, Dda, la Réunion, France. Cartes au 1/25 000.
- BROUWERS M., 1982. Le milieu physique et les sols de la zone de moyenne altitude de Saint-Paul. Aptitude à la canne à sucre. Cirad-Irat, Dda, la Réunion, France. Cartes au 1/25 000.
- BROUWERS, M., 1984. Reconnaissance pédologique de la zone de moyenne altitude de la Saline à Saint-Leu. Cirad-Irat, Dda, la Réunion, France. Cartes au 1/25 000.
- CABIDOCHÉ Y.-M. 1989. Problèmes soulevés par la caractérisation, à l'échelle de la parcelle, du statut cationique des sols ferrallitiques de Guadeloupe. In 25^e congrès de la Société caraïbe des plantes alimentaires. Gosier, 2-8 juillet 1989, Inra-centre Antilles-Guyane, France. 11 p., 4 tab., figures.
- CALCINO D.V., BURGESS D.J., 1995. Effect of urea placement on crop cycle yields of green trash blanketed sugarcane ratoons. Proceedings of the Australian Society of Sugarcane Technologists Conference, Australie. 17, p.193-198.
- CHABALIER P.-F., HELMANN M., PICHOT J., 1984. Nutrition de la canne à sucre dans plusieurs écologies de la Réunion : Différents comportements de quelques variétés. 8^e Congrès Stasm., revue sucrière de l'île Maurice 63 (2 et 3), mai-décembre 1984, p. 178-186.
- CHABALIER P.-F. et GAUDY F., 1988. Influence de la fertilité du sol et de la fertilisation NPK sur les rendements et la nutrition NPK de la canne à sucre. Association réunionnaise pour le développement de la technologie agricole et sucrière. 3^e congrès international, 16-23 octobre 1988. Saint-Denis, la Réunion, France, p. 368-382.
- CHABALIER P.-F., 1988. Schéma de fumure sur canne. Association réunionnaise pour le développement de la technologie agricole et sucrière. 3^e congrès international, 16-23 octobre 1988. Saint-Denis, la Réunion, France, p. 162-168.
- CHABALIER P.-F., 1989. Organisation et impact du conseil en fertilisation. L'exemple du Cirad à la Réunion. Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Montpellier, France, 12-15 septembre 1989. Cirad-Irat, Montpellier 1990, France, p. 439-451.
- CHABALIER P.-F., 1990. Fertilité et fertilisation. Cirad-Réunion, Saint-Denis, la Réunion, France, 90 p.

CHABALIER P.-F., Avril 1991. Mise en place d'une enquête-diagnostic sur la fertilisation de la canne à sucre au Mexique (région de Xalapa). Compte rendu de mission, février-mars 1991. Cirad-Réunion, Saint-Denis, la Réunion, France, 30 p.

CHABALIER P.-F., LEGIER P., 1992. Synthèse cartographique de la fertilité des sols de la Réunion. *L'Agronomie Tropicale* 41 (6) : 65-71.

CHAPMANS L. S., HAYSON M. B., SAFFIGNA P. G., 1994. The recovery of ^{15}N from labelled urea fertilizer in crop component of sugarcane and in soil profiles. *Australian Journal of Agricultural Research* 45 : 1 577-1 585.

CHAPMANS L.S., 1996. Splitting N fertilizer application - Does it increase production efficiency of sugarcane? In *Sugarcane : Research Towards Efficient and Sustainable Production*. WILSON J.R., HOGARTH D.M., CAMPBELL J.A. et GARSIDE AL. (éditeurs). Csiro Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane, Australie, p. 194-197.

CHECKOURI I., 1990. Appréciation du pouvoir minéralisateur des sols réunionnais par différentes méthodes chimiques et biologiques. Université de Perpignan, Cirad-Réunion, France, 40 p. + annexes.

Cirad, Ede, Sica-lait, Sier, avril 1988. Fiche n° 1, Fertilisation des prairies. 2 p.

Cirad, Ede, Sica-lait, Sier, avril 1988. Fiche n° 2, Niveau de production intensif, Plan de fumure des prairies. 2 p.

Cirad, Ede, Sica-lait, Sier, avril 1988. Fiche n° 3, Niveau de production semi-intensif, Plan de fumure des prairies. 2 p.

Cirad, Ede, Sica-lait, Sier, avril 1988. Fiche n° 4, Fumure de correction des prairies. 2 p.

Cirad, août 1995. Fertilisation canne à sucre. Conseil par micro-zone. Service d'agronomie Cirad, station de la Bretagne, la Réunion, France. Doc. Cirad, 50 p.

Cirad-Irfa-Réunion, Chambre d'agriculture de la Réunion. Mai 1992-1. La culture des ananas à l'île de la Réunion. Fiches techniques des cultures fruitières à la Réunion. Cirad-Irfa la Réunion, Station de Bassin Martin, 97455 Saint-Pierre, France. 8 p.

Cirad-Irfa-Réunion, Chambre d'agriculture de la Réunion. Mai 1992-2. La culture du bananier à l'île de la Réunion. Fiches techniques des cultures fruitières à la Réunion. Cirad-Irfa la Réunion, Station de Bassin Martin 97455 Saint-Pierre, France. 14 p.

CLARION A., 1991. Lutte contre la compaction en culture de canne à sucre à l'île de la Réunion. Caractérisation de l'espace poral du sol. Incidences agronomiques. Ceemat Réunion. Laboratoire de physique des sols. Doc. Cirad-Ceemat, la Réunion, France, 26 p.

Csr, Uh, Ncsu, 1986. Tropsoils. An expert system to determine lime requirements for soils of the humid tropics. Centre for Soils Research, Bogor, Indonesia. University of Hawai and North Carolina State University. Version ACID3B, 19 p.

DESCUNS C., 1992. Valorisation agronomique et cartographique de la base d'analyses de sol de la Réunion. Cirad, Enita. Cirad-Réunion, Saint-Denis, France. 36 p., 13 annexes.

DESSERT M., 1980. Engrais et plan de fumure. *Banane information*, n° 21, oct-nov-déc., Guadeloupe, Sica Assobag, p. 29-30.

DIDIER DE SAINT-AMAND D., 1965. Etude pédologique de la plaine des galets. Champ Borne, Bras Panon, Etang Salé à Saint Leu, Bras de la plaine. Cirad-Irat, GR, France. Cartes au 1/10 000.

DOS SANTOS M. A. C., DE SOBRAL A. F., PINTO MEDEIROS A., 1980. Effect of liming on the production of sugarcane and on the fertility of the soil in the state of Pernambuco. *Issct - Proc Manilla*, T1 Agronomy, p. 233243.

DURU M., 1992. Diagnostic de la nutrition minérale des prairies permanentes au printemps. II, validation de références. *Agronomie* 12 : 345-347.

FRENEY J.R., DENMEAD O.T., WOOD A.W., SAFFIGNA P.G., CHAPMAN L.S., HAM G.J., HURNEY A. P., STEWARD R.L., 1992. Factors controlling ammonia loss from trash covered sugarcane fields fertilized with urea. *Fertilizer Research*. Kluwer academic publisher 31 : 341-349.

FRITZ J., 1967. Recherche des carences minérales des sols de la Réunion en vases de végétation. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive (Madagascar), 19-25 novembre 1967. Paris, France, 1 : 381390.

FRITZ J., 1973. Dynamique de l'azote minérale dans le sol en deux situations de la Réunion. Cirad-Irat, la Réunion, France. Novembre 1973. 81 p.

HALAIS P., 1951. Foliar diagnosis, a new guide to fertilization of sugarcane in Mauritius. *Proceeding Issct*. 7th congress, Brisbane, Australie, 1950, p. 218-232.

HALAIS P., 1967. Normes du diagnostic foliaire pour les repousses de canne à sucre récoltables annuellement en régions tropicales. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive (Madagascar), 19-25 novembre 1967. Paris, France, 1 : 169-180.

KAMPRATH E. J., 1967. Soil acidity and response to liming. *Rech. Bull.* 4 International Soil Testing Series., Univ. Agri. Exp. Sta. Raleigh, Etats-Unis, Caroline du Nord.

KEATING B.A., VALLIS I., HUGHES M., RIDGE D.R., 1993. Strategic directions for nitrogen research. A view from the south. *Proceedings of the Australian Society of Sugarcane Technologists Conference*, 15 p. 276-284.

KILLIAN J., 1987. Carte morpho-pédologique au 1/75 000 de la région de Coatepec Xalapa (Etat de Vera Cruz). Orstom, Montpellier, France.

LATRILLE E., 1975. Grande Comore, inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales (Archipel des Comores). Paris, rapport Cirad-Irat 3 fasc., rapport 308 p., annexe 545 p., 2 cartes.

LATRILLE E., 1977. Mohéli, inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes

culturales (Archipel des Comores). Paris, rapport Irat 3 fasc., rapport 208 p. Annexe 178 p., 2 cartes.

LATRILLE E., 1981. Mayotte, inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales. Exploitation agronomique de la carte de l'inventaire des terres cultivables. Conclusions générales. Paris, France, 3 rapports Cirad-Irat, 96 p., 82 p. et 39 p., 2 cartes.

LELEUX A., AROUSSEAU P., ROUDAUT A., 1988. Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre. *Science du sol*, 26 (1) : 29-39.

LYONNAZ-PEROUX, B., septembre 1982. Influence des facteurs édaphiques et climatiques sur la croissance de la canne à sucre. Comparaison en parcelle industrielle et en essai variétal, de la variété S17 à quelques variétés réunionnaises récentes. Cnearc, Montpellier, France, Ensaa, Dijon, France. Laboratoire d'agronomie Cirad-Irat la Réunion, France. Polycop. 48 p. + annexes 34 p.

MARTIN-PREVEL, P., CHARPENTIER J.-M., 1963. Culture sur milieu artificiel. Symptômes de carences en six éléments minéraux chez le bananier. *Fruit* 18 (5) : 221-247.

MEYER J.H., WOOD R.R., LIEBBRANDT N.B., 1986. Recent advances in determining the N requirement of sugarcane in South Africa Industry. *Proceeding S. Af. Sug. Tech. Ass.* 60 : 205-211.

NG KEE KWONG K.F., DEVILLE J., 1987. Résidual fertilizer nitrogen as influenced by timing and nitrogen forms in a silty clay soil under sugarcane in Mauritius. *Martinus Nijhoff publisher*, Pays-Bas. *Fertilizer Research* 14 : 219-226.

NG KEE KWONG K.F., DEVILLE J., 1992. Nitrogen fertilizer use by sugarcane ratoon crops in Mauritius. *ISSCT Proc.* 21 Congrès, Bangkok, Thaïlande, 5-14 mars 1992, Vol 2, p. 42-55.

NG KEE KWONG K.F., 1995. L'engrais azoté à travers le goutte à goutte. *Recherche sucrière*, Prosi 312 : 26-28.

PERRET S., 1989. Caractéristiques physiques et mécaniques des sols andiques de l'île de la Réunion. Ceemat Réunion. Laboratoire de physique des sols. Doc. Ceemat Réunion, France, 13 p.

PERRET S., 1993. Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Facteurs d'évolution des horizons culturaux, implications agronomiques et écologiques. Ministère de l'agriculture et de la forêt, Ensam. Thèse de doctorat, Cirad-sar, Montpellier, janvier 1993, 279 p. + annexes 34 p.

PIERI C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de 30 années de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère français de la coopération et du développement, Paris, France, Cirad-Irat, Montpellier, France, 444 p.

POUZET D., CHABALIER P.-F., LEGIER P., 1998. Fertilité des sols et conseil en fertilisation : système expert d'interprétation des analyses chimiques des sols réunionnais.

Amendement et conseil en fertilisation pour la canne à sucre, les graminées fourragères, l'ananas et le bananier. Cirad-ca / Cas, Saint-Denis, la Réunion, France. Document de travail du Cirad-ca, Montpellier, France, 97 p.

QUEMENER J., 1985. L'interprétation des analyses. Cultivar, Dossier analyse, juin 1985, 184 : 107-117.

RAUNET M., 1986. Morphopédologie et aptitude à la mise en valeur des périmètres de Saint Gilles et de Saint Leu, la Réunion, France. Cartes au 1/5 000 et carte de reconnaissance de la zone ouest au 1/25 000.

RAUNET M., 1988. Carte morphopédologique au 1/50 000 de l'île de la Réunion. Cirad-Irat, la Réunion, France. 4 feuilles.

RAUNET M., 1989. Carte morphopédologique au 1/250 000 de l'île de la Réunion. Cirad-Irat, Paris, France.

RAUNET M., 1990. Les grandes catégories de sol de l'île de la Réunion. Notice de la carte morphopédologique à l'échelle du 1/50 000. Cirad-Irat, Conseil régional, la Réunion, France, Fidar. 17 p.

RAUNET M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. Cirad, Montpellier, France. 438 p., 4 cartes couleur au 1/5 0000.

REMY J.-C., MARIN-LAFLECHE A., 1973. L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique.

Inra, station agronomique de l'Aisne, Laon, France. 19 p.

RIQUIER J., 1960. Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance au 1/10 000. Orstom, Irsm, Pédologie. Tananarive, Madagascar, 72 p.

RIQUIER J., ZEBROWSKI C., 1975. Pédologie. Atlas de la Réunion. Cget et Ign, France.

ROCHE P., GRIERE L., CALBA H., FALLAVIER P., 1978. La carence en phosphore des sols intertropicaux et ses méthodes d'appréciation : premières conclusions. 11^e congrès Isss, p. 1-24.

ROCHE P., GRIERE L., BABRE D., CALBA H., FALLAVIER P., 1980. Le phosphore dans les sols intertropicaux : appréciation des niveaux de carence et des besoins en phosphore. Imphos, Gerdat, Paris, France. 48 p.

SALETTE J., HUCHE L., 1991. Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par analyse du végétal : principe, mise en œuvre, exemples. Fourrages 125 : 3-18.

Scpa, 1981. Pratique de la fertilisation raisonnée. Grande culture et prairie. Société commerciale des potasses et de l'azote, Mulhouse, France. 25 p.

SNOECK D., SNOECK J., 1988. Programme informatisé pour la détermination des besoins en engrais minéraux pour les caféiers arabica et robusta à partir des analyses du sol. Café, Cacao, Thé 22 (3) : 201-212.

SNOECK J., JADIN P., 1990. Mode de calcul pour l'étude de la fertilisation minérale des caféiers basée sur l'analyse du sol. Café, Cacao, Thé 24 (1) : 3-21.

STIPA, 1982. Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sol en banque de données. Système de transfert de l'information pédologique et agronomique, STIPA. 2^e édition, 1982, Inra, France, Cirad-Irat, Montpellier, France, 125 p., annexe.

TAKAHASHI D.T., 1968. Fate of ammonium and nitrate fertilizers in lysimeter studies with ¹⁵N. Experiment station, Hawaiian sugar planters' association. Hawaiian Planters' record 58, 11 p.

TSAI C.S., FANG Y.T., CHEN Y.Y., CHEN C.F., 1992. Fertigation with urea solution of sugarcane in clay soil. Isst Proc. 21 Congrès, Bangkok, Thaïlande, 5-14 mars 1992, vol. 2 p. 56-66.

VALLIS I., CATCHPOOL V.R., HUGHES R.M., MYERS R.J., WEIER K.L., 1996. Recovery in crops and soils of ¹⁵N applied as sub-surface bands of urea to sugarcane. Australian Journal of Agricultural Research, 47 : 355-370.

WOOD A.W., SAFFIGNA P.G., PRAMMANEE P., FRENEY J.R., 1989. Loss of nitrogen from urea applied to sugarcane trash in North Queensland. Isst Proc. 20 Congrès ; Sao Paulo, Brésil. Vol 2, Agronomy : 481-488.

Résumé... Abstract... Resumen

D. POUZET, P.-F. CHABALIER, P. LEGIER — Diagnostic de fertilité des sols et conseils en fertilisation des principales cultures réunionnaises.

Confronté à la demande des agriculteurs et des institutions du développement, le Cirad-Réunion s'est préoccupé très tôt de définir des normes d'interprétation des analyses de sol pour élaborer des conseils en fertilisation. Un système expert opérationnel d'interprétation automatique des analyses de sol et de conseil en fertilisation en résulte. Ce système repose sur une classification préalable des sols en fonction de leurs origines morphopédologiques et de leurs caractéristiques chimiques. Des clefs d'interprétation spécifiques à chaque type de sol ainsi définies autorisent un diagnostic de fertilité pour l'acidité, les éléments minéraux majeurs et les oligoéléments. Ces diagnostics sont utilisés, d'une part pour rectifier les principales carences du sol par un amendement approprié et, d'autre part pour élaborer un conseil en fertilisation d'entretien adapté aux besoins des cultures. Le système expert a été conçu pour la canne à sucre, principale culture de l'île. Il a été ensuite étendu aux graminées fourragères, à l'ananas et au bananier.

Mots-clés : système expert, fertilisation, canne à sucre, bananier, graminées fourragères, ananas, sols, la Réunion.

D. POUZET, P.-F. CHABALIER, P. LEGIER — Analysis of soil fertility and fertilizer recommendations for the main crops grown in Réunion.

Following requests from farmers and development organizations, CIRAD-Réunion has been working on standard methods of interpreting soil analyses in order to develop fertilizer use recommendations. An expert system that interprets soil analyses automatically has been developed for this purpose. This system involves a preliminary classification of soils in terms of their morphopedological origins and chemical characteristics. Specific keys are then used to interpret each soil type, evaluating acidity, major elements, and trace elements. These analyses are used to rectify the main deficiencies in the soil by applying appropriate mineral fertilizers and to recommend a fertilizer policy adapted to crop needs. The expert system was designed for sugarcane, the island's main crop. It was then further developed for pasture grass, pineapple, and banana.

Key words: expert system, fertilization, pasture grass, banana, pineapple, sugarcane, soil, Réunion.

D. POUZET, P.-F. CHABALIER, P. LEGIER — Diagnóstico de fertilidad de los suelos y consejos en fertilización de los principales cultivos reünioneses.

Enfrentado a la petición de los agricultores y de las instituciones del desarrollo, el CIRAD-Réunion se preocupó muy temprano por definir normas de interpretación de los análisis de suelo para elaborar consejos en fertilización. Un sistema experto operacional de interpretación automática de los análisis de suelo y de consejo en fertilización deriva de ello. Este sistema se fundamenta en una clasificación previa de los suelos acorde a sus orígenes morfopedológicos y sus características químicas. Llaves de interpretación específicas a cada tipo de suelo así definidas autorizan un diagnóstico de fertilidad para la acidez, los elementos minerales mayores y los oligoelementos. Se utilizan estos diagnósticos, por un lado, para rectificar las principales carencias del suelo mediante un abono apropiado y, por otro lado, para elaborar un consejo en fertilización de mantenimiento adaptado a las necesidades de los cultivos. El sistema experto fue concebido para la caña de azúcar, principal cultivo de la isla. Más tarde fue extendido a las gramíneas forrajeras, a la piña y al plátano.

Palabras-claves: sistema experto, fertilización, gramínea forrajera, plátano, piña, caña de azúcar, suelo, la Reunión.